

**Toric surface curvature radius interferometric measurement method for esp. eye cornea****Veröffentlichungsnummer** DE19507036**Veröffentlichungsdatum:** 1996-09-05**Erfinder** DORSEL ANDREAS DR RER NAT (US); DONNERHACKE KARL-HEINZ DR RER (DE); MASCHKE GUENTER DIPL ING (DE); MOELLER BEATE DIPL PHYS (DE); FRASCH HANS-JOACHIM (DE)**Anmelder:** ZEISS CARL JENA GMBH (DE)**Klassifikation:****- Internationale:** G01B9/02; G01B11/24; G01J1/60; A61B3/107**- Europäische:** A61B3/107; G01B11/255; G01J1/60**Anmeldenummer:** DE19951007036 19950301**Prioritätsnummer(n):** DE19951007036 19950301**Report a data error here****Zusammenfassung von DE19507036**

The method involves using two collimated coherent beams of light and two detection cameras detecting light at respective different frequencies. Spherical waves from the beams interfere with each other and are blended out from the illumination beam course e.g. a laser beam, across a polarisation beam divider (5). The resulting interference image is detected simultaneously at least two different optical wavelengths. The interference strip distance is determined with each of the two wavelengths. Also from these and the wavelength difference, the curvature radius in the plane of the illumination formed by the coherent is determined. The strip distances are determined three times at least following the alteration of the angle of the illumination plane relative to the main axes of the toric surface. The orientation of the main axes and the main curvature radii is determined from the strip distances.

---

Daten sind von der [esp@cenet](mailto:esp@cenet) Datenbank verfügbar - Worldwide



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 195 07 036 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**G 01 B 9/02**  
G 01 B 11/24  
G 01 J 1/60  
A 61 B 3/107

②1 Aktenzeichen: 195 07 036.4  
②2 Anmeldetag: 1. 3. 95  
④3 Offenlegungstag: 5. 9. 96

DE 195 07 036 A 1

⑦1 Anmelder:  
Carl Zeiss Jena GmbH, 07745 Jena, DE

⑦2 Erfinder:  
Dorsel, Andreas, Dr.rer.nat., Menlo Park, Calif., US;  
Donnerhacke, Karl-Heinz, Dr.rer.nat., 07747 Jena,  
DE; Maschke, Günter, Dipl.-Ing., 07745 Jena, DE;  
Möller, Beate, Dipl.-Phys., 07743 Jena, DE; Fräsch,  
Hans-Joachim, Dipl.-Math., 73431 Aalen, DE

⑥4 Verfahren und Anordnung zur interferometrischen Messung der Krümmungsradien von torischen Flächen

⑥7 Verfahren und Anordnung zur interferometrischen Messung der Krümmungsradien von torischen Flächen und der Orientierung ihrer Hauptachsen, insbesondere der Augenhornhaut, wobei durch Beleuchtung der Oberfläche mit mindestens zwei kollimierten kohärenten Strahlen ein durch Überlagerung der von virtuellen Punktbildern ausgehenden, reflektierten divergenten Kugelwellen entstehendes Interferenzbild erzeugt wird, das entstehende Interferenzbild bei mindestens zwei unterschiedlichen optischen Weglängen gleichzeitig detektiert wird und bei jeder der beiden optischen Weglängen der Interferenzstreifenabstand bestimmt und aus diesen und dem Weglängenunterschied der Krümmungsradius in der durch die kohärenten Strahlen gebildeten Ebene der Beleuchtung ermittelt wird, indem optische Mittel zur Beleuchtung der torischen Fläche mit mindestens zwei kollimierten kohärenten Strahlen, die zueinander einen Winkel ( $\alpha$ ) einschließen sowie mindestens zwei, in unterschiedlicher optischer Weglänge in den von der Oberfläche reflektierten, interferierenden, von virtuellen Punktbildern ausgehenden divergenten Teilstrahlengängen angeordnete ortsauflösende Detektoranordnungen, die mit einer Auswerteeinheit verbunden sind, vorgesehen sind.

DE 195 07 036 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zur interferometrischen Messung der Krümmungsradien und der Lage der Hauptachsen von torischen Flächen, insbesondere der Augenhornhaut.

Zur Erfassung der Form der Augenhornhaut und ihrer Krümmungsradien sind die verschiedensten Verfahren bekannt.

So ist in DE 31 22 029 A1 ein Keratometer beschrieben, bei dem mehrere Punktlichtquellen auf verschiedene Bereiche des Auges abgebildet werden, deren Bildlage über Detektoren und bewegliche Blenden bestimmt wird.

In DE 30 00 995 A1 wird ein entfernungsunabhängiges Ophthalmometer beschrieben, bei dem der Abstand zweier auf der Hornhaut erzeugter Spiegelbilder von Meßmarken mittels schwenkbarer Planplatten bestimmt wird.

DE 31 23 774 C2 beschreibt die Bestimmung der Form der Hornhaut unter Verfolgung von mit Hilfe von zwei unabhängig voneinander bewegbaren Lichtquellen erzeugten Reflexen.

In DE 32 33 178 C2 werden mehrere ringförmige Marken in Form von konzentrisch angeordneten ringförmigen Figuren sowie lineare Marken auf die Augenhornhaut projiziert und das entstehende Bild ausgemessen.

Die Auswertung ist relativ aufwendig.

DE 36 12 787 A1 beschreibt ein Verfahren und Anordnungen zur interferometrischen Messung der Form der Hornhautvorderfläche.

Die Eintrittspupille des Probanden wird mit einem Laserstrahl beleuchtet und das Interferogramm zwischen den vom Augenfundus und von der Hornhautvorderfläche reflektierten Lichtbündeln ausgewertet, indem die Topografie der Hornhautvorderfläche erfaßt und ausgewertet wird.

Durch die Verwendung der Augennetzhaut als Referenzfläche ist das erhaltene Interferenzbild von den Abbildungsfehlern des Auges und den Funduseigenschaften abhängig.

In DE 42 10 384 A1 wird unter anderem eine Vorrichtung zur Keratometrie beschrieben, bei der von der Hornhaut reflektiertes Laserlicht in einer Detektorebene mit Licht eines Referenzarmes interferiert.

Das entstehende Interferenzmuster dient der Information über die Hornhautform.

DE 40 37 789 A1 beschreibt die zeitliche Erfassung von Interferenzmustern, die durch Vereinigung eines auf das Auge geführten Meßlichtstrahls und eines Referenzlichtstrahls entstehen, mittels einer Videokamera. Da die Messungen zeitlich nacheinander erfolgen, wobei der Abstand zur analysierenden Oberfläche geändert wird, können durch unkontrollierte Bewegungen des Patienten Meßfehler auftreten.

Der Erfindung liegt nunmehr die Aufgabe zugrunde, ein berührungsloses Meßverfahren sowie eine Meßanordnung zur interferometrischen Messung der Krümmungsradien und der Lage der Hauptachsen von torischen Flächen zu realisieren, die ohne bewegte Teile auskommen sowie einfach justierbar und genau sind.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale des ersten und zweiten Anspruchs gelöst.

Bevorzugte Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen enthalten.

Aufbau, Wirkungsweise und Vorteile der Erfindung werden nachstehend anhand der schematischen Dar-

stellungen in Fig. 1 und 2 näher erläutert.

Ein kollimierter Strahl einer Lichtquelle 1, beispielsweise einer Laserdiode, erzeugt über ein Gitter 2 zwei kollimierte Teilstrahlen, die unter einem Winkel  $\alpha$  zueinander nach Passieren einer Viertelwellenplatte 4 und eines Polarisationsstrahlenteilers 5 auf die Augenhornhaut auftreffen.

Die an der Hornhaut reflektierten, von den (virtuellen) Punkten 3, 3' ausgehenden Kugelwellen interferieren miteinander und werden über den Polarisationsstrahlenteiler 5 aus dem Beleuchtungsstrahlengang ausgeblendet.

Eine weitere vorteilhafte, nicht dargestellte Variante besteht darin, ein optisches Element, beispielsweise ein Umlenkprisma, zwischen den Beleuchtungsstrahlen anzuordnen, das das Interferenzmuster in Richtung einer Detektion ausblendet. Dabei können Viertelwellenplatte und Polarisationsstrahlenteiler entfallen.

Ein weiterer Strahlenteiler 6 erzeugt einen Beobachtungsstrahlengang 7 sowie einen Detektionsstrahlengang 8, aus dem über einen weiteren Strahlenteiler 9 das Interferenzbild auf einen ersten Detektor 10 und einen zweiten Detektor 11, der sich um eine Länge  $\Delta = s_2 - s_1$  weiter vom Strahlenteiler 9 entfernt befindet, abgebildet wird. Mittels der in unterschiedlichem Abstand angeordneten ortsauflösenden Detektoren, vorzugsweise CCD-Zeilenempfängern, wird über die Auswerteeinheit jeweils der Interferenzstreifenabstand bestimmt.

Der gesuchte Krümmungsradius R ergibt sich zu

$$R = 2 \lambda \cdot \Delta / (\alpha^2 \cdot (g_2 - g_1))$$

dabei ist

$\lambda$  die Wellenlänge des verwendeten Lichtes

$\Delta = s_2 - s_1$  der Wegunterschied der Meßwege vom Auge zu Detektor 10 bzw. 11

$\alpha$  der volle Winkel zwischen den beiden auf das Auge treffenden Teilstrahlenbündeln

$g_2$  der Streifenabstand auf dem weiter entfernten Detektor

$g_1$  der Streifenabstand auf dem näheren Detektor.

Macht man  $\alpha$  mittels des Gitters wellenlängenabhängig, so erzielt man eine z. B. für Modensprünge von Laserdioden ausreichende "Achromatisierung".

Alternativ lassen sich die gegeneinander geneigten, kollimierten Strahlen beispielsweise auch mit Hilfe mindestens einer Keilplatte, eines Biprismas oder eines Winkelspiegels erzeugen.

Die vom Auge reflektierte Strahlung kann durch geeignete optische Mittel mit unterschiedlichem optischen Weg, beispielsweise — wie in Fig. 1 dargestellt, auf eine entsprechend angeordnete zweite Empfängerzeile, oder auf ein zweites Teilstück der gleichen Empfängerzeile oder auf eine zweite Zeile einer Doppelzeile geführt werden.

Delta kann man beispielsweise auch einfach dadurch erzeugen, daß vor eine CCD-Zeile eine Glasplatte eingefügt wird, die diese zur Hälfte abdeckt; Meßlicht, welches durch die Glasplatte zum Detektor gelangt, erzeugt dann dort ein Interferenzstreifenmuster mit einer anderen Ortsfrequenz als solches, das direkt auf den Empfänger fällt. Eine Platte der Dicke D und der Brechzahl n wirkt dabei ebenso wie eine effektive Verkürzung des optischen Weges um  $D \cdot (1 - 1/n)$ , d. h. die Streifen rücken enger zusammen,  $g_1$  wird kleiner als  $g_2$  und Delta nimmt negative Werte an.

Dabei ist es denkbar, die Zeile in der Höhe oder in der Breite bis zur Hälfte abzudecken.

Neben der bereits erwähnten Glasplatte ist bei Verwendung einer geteilten Empfängerzeile auch die Verlängerung der optischen Weglänge für ein Teilstück durch zusätzliche Umlenkmittel wie Spiegel denkbar.

Eine andere mögliche Erzeugung des Gangunterschiedes besteht darin, vor der Zeile eine passend orientierte Platte aus doppelbrechendem Material einzufügen. Das Interferenzmuster ist dann die Summe zweier Intensitätsverteilungen mit unterschiedlichen Ortsfrequenzen, die sich in der Auswertung des Zeilensignals (z. B. mit FFT-Algorithmen) gut trennen lassen.

Ebenso ist die Verwendung eines Polarisationsstrahlteilers und unterschiedliche Verlängerung der optischen Wege der beiden unterschiedlich polarisierten Strahlen durch Umlenkmittel denkbar.

Eine weitere vorteilhafte Variante ist es, den Wegunterschied Delta durch Abbildung des Interferenzmusters aus zwei verschiedenen Tiefen-Schärfenebenen im gegenseitigen Abstand Delta auf eine oder mehrere Detektoranordnungen zu erzeugen.

Zur Justage des auf das Auge gelenkten Strahlenganges reicht es aus, die Quellpunkte der divergenten Quellen 3, 3' (virtuelle Punktbilder) in der Augenpupille zu justieren, d. h. symmetrisch zum Zentrum anzuordnen und in die Schärfenebene der Beobachtungsebene zu bringen.

Hierzu ist eine entsprechende Beobachtungsmöglichkeit (visuell oder über Kamera) vorzusehen.

Möglich ist auch der Einsatz einer oder mehrerer Justierlichtquellen, evtl. mit unterschiedlicher Wellenlänge.

Mit einem Detektor, wie oben dargestellt, beispielsweise einer CCD-Zeile in der durch die Beleuchtungsstrahlen aufgespannten Ebene wird der Krümmungsradius der zu vermessenden Fläche in dieser Ebene gemessen.

Bei der Vermessung von torischen Flächen ergibt sich die Möglichkeit, mit mehreren ähnlichen Anordnungen, die um die optische Achse gegeneinander verdreht sind, die Hauptkrümmungsradien und deren Orientierung zu messen.

Bei Beleuchtung einer torischen Fläche mit zwei kollimierten Strahlen, die einen Winkel zueinander einschließen, ist die Orientierung der entstehenden Interferenzstreifen zur Beleuchtungsebene abhängig von der Lage der Hauptachsen der torischen Fläche zur Beleuchtungsebene.

Man kann nun durch Beleuchtung der Fläche mittels einer erfinderischen Anordnung und Detektierung mittels CCD-Array diesen Winkel und damit die Lage der Hauptachsen bestimmen.

Wie oben bereits ausgeführt, müssen auch hier mindestens zwei Empfängeranordnungen mit um Delta unterschiedlicher optischer Weglänge angeordnet sein.

Anstatt eines CCD-Array kann man auch mindestens drei CCD-Zeilen in unterschiedlicher Orientierung zur optischen Achse verwenden. Eine besonders vorteilhafte Variante ist die Verwendung von mindestens drei erfindungsgemäßen Beleuchtungseinrichtungen 13 mit jeweils zwei unter einem Winkel einfallenden Strahlen.

Die Untersysteme können insbesondere um 45 oder 60 Grad gegeneinander verdreht sein.

Dabei können die drei Richtungen auch durch schnelles Drehen, Blenden oder An- und Abschalten von Lichtquellen erzeugt werden.

Wenn für eine torische Fläche die von den kollimierten Strahlen der Meßanordnung aufgespannte Ebene in einer der Hauptachsen mit den Haupttradien Rx, Ry der

torischen Fläche liegt, ergeben sich die Streifenabstände  $g_x$  bzw.  $g_y$ .

Aus einer Verdrehung um einen Winkel  $\vartheta$  zwischen der Beleuchtungsebene und einer der Hauptachsen resultiert ein Streifenabstand G, der folgende Gleichung erfüllt:

$$1/G^2 = \cos^2 \vartheta / g_x^2 + \sin^2 \vartheta / g_y^2$$

Bei drei Messungen mit unterschiedlichen Winkeln  $\vartheta$  werden jeweils die Streifenabstände G gemessen, so daß aus dem entstehenden Gleichungssystem die zu den Haupttradien Rx, Ry gehörenden Streifenabstände  $g_x$  und  $g_y$  sowie  $\vartheta$  berechnet werden können.

In Fig. 2 sind drei vor dem Auge gegeneinander versetzte Beleuchtungsanordnungen 13.1, 13.2 sowie 13.3 dargestellt, deren Positionen auch durch Verdrehung einer Beleuchtungsanordnung 13 erzeugt werden können.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur interferometrischen Messung der Krümmungsradien von torischen Flächen, insbesondere der Augenhornhaut, wobei durch Beleuchtung der Oberfläche mit mindestens zwei kollimierten kohärenten Strahlen ein durch Überlagerung der von virtuellen Punktbildern ausgehenden, reflektierten divergenten Kugelwellen entstehendes Interferenzbild erzeugt wird,

das entstehende Interferenzbild bei mindestens zwei unterschiedlichen optischen Weglängen gleichzeitig detektiert wird und bei jeder der beiden optischen Weglängen der Interferenzstreifenabstand bestimmt und aus diesen und dem Weglängenunterschied der Krümmungsradius in der durch die kohärenten Strahlen gebildeten Ebene der Beleuchtung ermittelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Winkel der Beleuchtungsebene bezüglich der Hauptachsen der torischen Fläche verändert wird und mindestens dreimal die Streifenabstände bestimmt werden und daraus die Orientierung der Hauptachsen und die Hauptkrümmungsradien bestimmt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Winkel kontinuierlich verändert und die Lage der Hauptachsen aus dem ermittelten maximalen und minimalen Krümmungsradius bestimmt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß in mindestens einer der optischen Weglängen die Streifenverdrehung und daraus die Orientierung der Hauptachsen zur Beleuchtungsebene ermittelt wird.

5. Anordnung zur interferometrischen Messung der Krümmungsradien und der Lage der Hauptachsen von torischen Flächen, insbesondere der Augenhornhaut, bestehend aus optischen Mitteln zur Beleuchtung der torischen Fläche mit mindestens zwei kollimierten kohärenten Strahlen, die zueinander einen Winkel ( $\alpha$ ) einschließen sowie mindestens zwei, in unterschiedlicher optischer Weglänge in den von der Oberfläche reflektierten, interferierenden, von virtuellen Punktbildern ausgehenden divergenten Teilstrahlengängen angeordneten ortsauflösenden Detektoranordnungen, die mit ei-

ner Auswerteeinheit verbunden sind.

6. Anordnung nach Anspruch 5, wobei ein optisches Element zur Ausblendung der interferometrischen Teilstrahlengänge aus den Beleuchtungsstrahlengängen in Richtung der Detektoranordnungen vorgesehen ist.

7. Anordnung nach Anspruch 6, wobei die Ausblendung über einen Strahlenteiler erfolgt.

8. Anordnung nach einem der Ansprüche 5–7, wobei zur Erzeugung eines ersten Meßabstands in den interferierenden Teilstrahlengängen ein Strahlteiler zur Ausblendung auf einen ersten Detektor vorgesehen ist und in einem zweiten Meßabstand im nicht ausgeblendeten Strahlengang ein zweiter Detektor angeordnet ist.

9. Anordnung nach einem der Ansprüche 5–8, wobei zur Erzeugung der beiden kollimierten Strahlen mindestens ein Gitter vorgesehen ist.

10. Anordnung nach einem der Ansprüche 5–8, wobei zur Erzeugung der beiden kollimierten Strahlen mindestens eine Keilplatte, ein Biprisma oder ein Winkelspiegel verwendet wird.

11. Anordnung nach einem der Ansprüche 5–10, wobei die kollimierten Strahlengänge symmetrisch zur optischen Achse unter gleichem Einstrahlwinkel angeordnet sind.

12. Anordnung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Abbildung von Interferenzmustern aus um eine Differenz Delta unterschiedlichen Schärfenebenen auf mindestens eine Detektoranordnung erfolgt.

13. Anordnung nach einem der Ansprüche 5–11, wobei sich eine Detektoranordnung in einem Abstand von der Kugeloberfläche befindet, jedoch aus zwei Teilen besteht, wobei durch optische Mittel die optische Weglänge der Teilstrahlengänge für mindestens einen Teil verändert wird.

14. Anordnung nach Anspruch 13, wobei die Teile der Detektoranordnung ein- und derselben Detektorzeile zugeordnet sind.

15. Anordnung nach Anspruch 13, wobei mindestens zwei Detektoranordnungen vorgesehen sind.

16. Anordnung nach einem der Ansprüche 13–15, wobei die Veränderung der optischen Weglänge durch Einfügen mindestens einer Glasplatte vor einem Teil der Detektoranordnung erzeugt wird.

17. Anordnung nach einem der Ansprüche 13–15, wobei für einen Teil der Detektoranordnung eine Verlängerung der optischen Weglänge durch zusätzliche Umlenkelemente realisiert wird.

18. Anordnung nach einem der Ansprüche 5–17, gekennzeichnet durch Anordnung einer doppelbrechenden Platte vor mindestens einer Detektoranordnung.

19. Anordnung nach einem der Ansprüche 5–18, dadurch gekennzeichnet, daß eine CCD-Kamera als Detektoranordnung vorgesehen ist.

20. Anordnung nach einem der Ansprüche 5–19, gekennzeichnet durch mehrere gegeneinander um die optische Achse verdrehte Anordnungen zur Messung des Krümmungsradius der Orientierung der Hauptachsen.

21. Anordnung nach einem der Ansprüche 5–19, gekennzeichnet durch mindestens drei zueinander jeweils einen Winkel einschließende CCD-Zeilen zur Detektion des Interferenzbildes.

22. Anordnung nach einem der Ansprüche 5–19, gekennzeichnet durch mindestens eine CCD-Zeile

und mindestens drei zueinander unter jeweils einem Winkel orientierten Anordnungen aus mindestens zwei kollimierten kohärenten Strahlen.

23. Anordnung nach einem der Ansprüche 5–22, gekennzeichnet dadurch, daß die Detektoranordnung und/oder die Anordnung der kollimierten kohärenten Strahlen um die optische Achse verdrehbar sind, wobei jeweils eine Messung des Interferenzstreifenabstandes erfolgt.

---

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

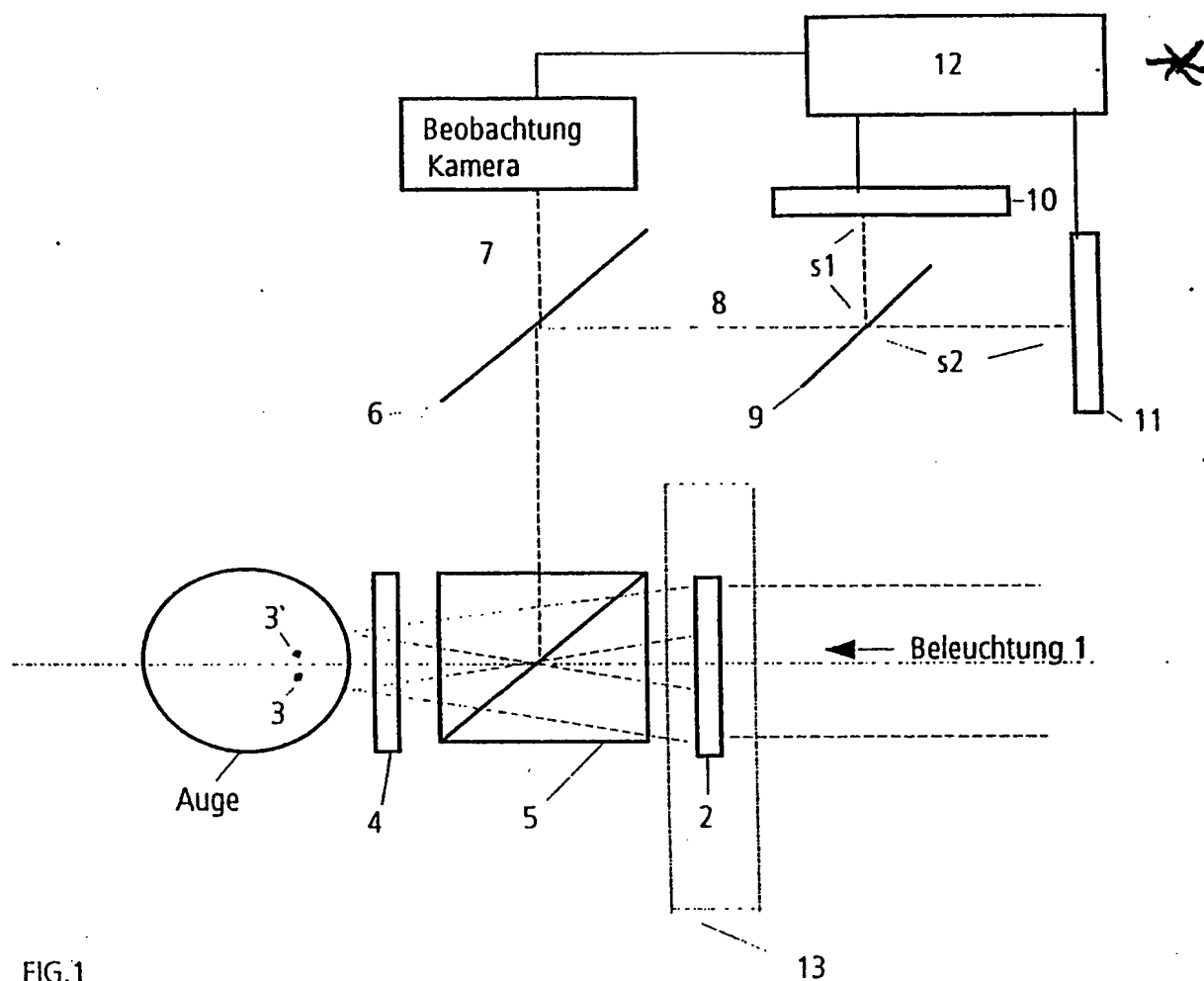


FIG.1

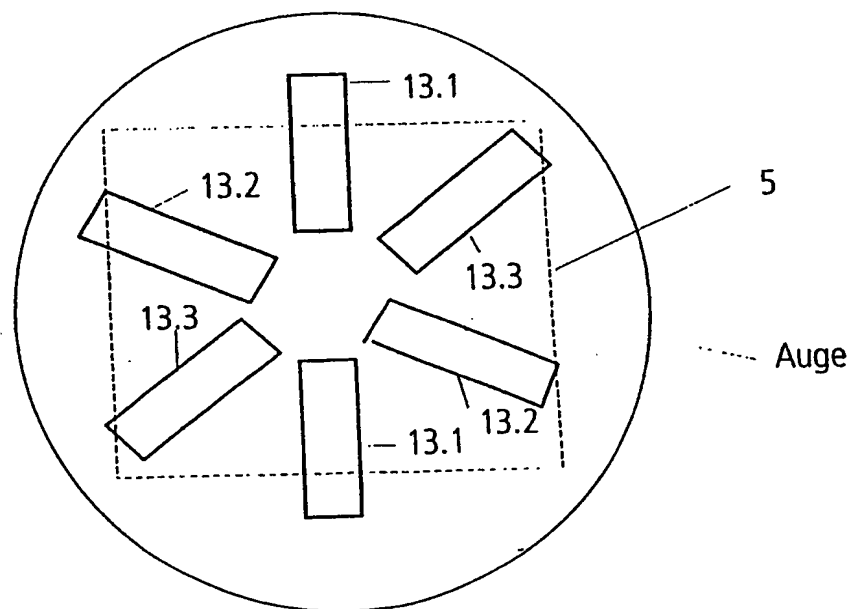


FIG.2